

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

УДК 629.7

**ПОБУДОВА КУРСОВЕРТИКАЛІ З РОЗДІЛЕННЯМ КАНАЛІВ КОРЕКЦІЇ.
ЧАСТИНА 2: АЛГОРИТМИ КОРЕКЦІЇ***Лакоза С. Л., Мелешко В. В.**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна
mvv44@mail.ru*

На основі теоретичних викладок, приведених у першій частині статті приведено два методи розділення каналів корекції.

Розроблено алгоритми безплатформної курсовертикалі, де реалізовані запропоновані методи.

Перший алгоритм розроблено з використанням матриці напрямних косинусів. Другий алгоритм у якості параметрів орієнтації використовує кватерніон. Для розділення каналів використовується інформація про орієнтацію, отримана на першому етапі корекції. У першому алгоритмі розділення реалізовано шляхом віднімання вертикальної складової магнітного поля та вибору корекції для відповідних стовпчиків матриці напрямних косинусів. У другому – шляхом спеціального алгоритмічного обнулення вертикальної складової магнітного поля Землі у вимірюваннях магнітометрів та модифікації опорного вектору.

***Ключові слова:** безплатформна курсовертикаль, корекція, розділення каналів корекції, кватерніони.*

Вступ

У першій частині статті (див. [1]) було описано розширення області застосування мікромеханічних систем, описано основні особливості застосування курсовертикалей, знайдено вирази для похибок системи. На основі аналізу похибок було запропоновано два методи вирішення задачі розділення каналів корекції. Перший метод стосувався алгоритму із використанням матриці напрямних косинусів (МНК) у якості кінематичних параметрів, другий – кватерніонів. У першому методі для отримання кінцевої МНК, третій стовпчик потрібно брати з етапу корекції по акселерометрах, а другий стовпчик – з етапу корекції по магнітометрах [1].

Розв'язання задачі розділення каналів корекції для алгоритму з кватерніонами (для МНК це теж залишиться справедливим) полягає у виборі опорних векторів, що мають в навігаційній системі координат проекції лише на одну з вісей. Тобто опорні вектори мають бути взаємно перпендикулярними.

Дана стаття присвячена розробці двох алгоритмів розділення каналів корекції для безплатформних курсовертикалей (БКВ) на базі мікромеханічних датчиків.

Перший алгоритм розроблений для матриці напрямних косинусів, другий – для кватерніонів.

Алгоритм БКВ із розділенням каналів корекції для матриці напрямних косинусів

На першому етапі алгоритму поточне значення МНК $\hat{C}_{k+1}^{n \rightarrow b}$ розраховують по даним про орієнтацію об'єкта на попередньому кроці $\hat{C}_k^{n \rightarrow b}$, чисельно інтегруючи рівняння Пуассона по даних датчиків кутової швидкості (ДКШ) (ф.(2) з [1]). На другому етапі виконується корекція $\hat{C}_{k+1}^{n \rightarrow b}$ по даних акселерометрів та магнітометрів.

Акселерометри вимірюють уявне прискорення $\vec{a}_{xyz} = C^{n \rightarrow b} (\vec{W}_{\xi\eta\zeta} - \vec{G}_n)$. Вважаючи $\vec{W}_{\xi\eta\zeta}$ за випадкове збурення, ми можемо записати вимірювання акселерометрів наступним чином:

$$\vec{A}^b = -C^{n \rightarrow b} \vec{G}_n + \vec{w}; \quad \vec{G}_n = [0 \ 0 \ -g]^T; \quad g = 9.81.$$

Проекції уявного прискорення на вісі зв'язаної системи координат (рис. 1):

$$\begin{aligned} a_x^b &= g \sin \vartheta; \\ a_y^b &= g \cos \vartheta \sin \gamma; \\ a_z^b &= g \cos \vartheta \cos \gamma; \end{aligned} \quad (1)$$

де $\vec{w} = C^{n \rightarrow b} \vec{W}_{\xi\eta\zeta}$ – випадкова складова невідомого збурення [2].

Порівнюючи вирази (1) з елементами МНК по формулі (2) з [1], ми можемо оцінити третій рядок матриці $C^{b \rightarrow n}$ (або те ж саме, що третій стовпець

$C^{n \rightarrow b}$) на основі вимірювань акселерометрів:

$$c_{31}^{b \rightarrow n} = a_x / g; \quad c_{32}^{b \rightarrow n} = a_y / g; \quad c_{33}^{b \rightarrow n} = a_z / g. \quad (2)$$

З виразу (2) ми можемо записати рівняння вимірювань, як $\vec{y} = \vec{A}^b / g$.

Потрібно відмітити, що для третього рядка МНК має виконуватися умова нормування [3, с.34], котру можна компактно записати, позначивши цей рядок через вектор $\vec{r}_1 = (c_{31}^{b \rightarrow n}; c_{32}^{b \rightarrow n}; c_{33}^{b \rightarrow n})^T$: $\|\vec{r}_1(t)\| = 1$. Також необхідно забезпечити $\|\vec{r}_1(0)\| = 1$. Це умова нормування для рядків та стовпців МНК.

Використовуючи вищенаведений матеріал, ми можемо записати рівняння БКВ з першим каналом корекції у просторі станів (при цьому можна використати не всю МНК $C^{b \rightarrow n}$, а лише її третій рядок \vec{r}_1).

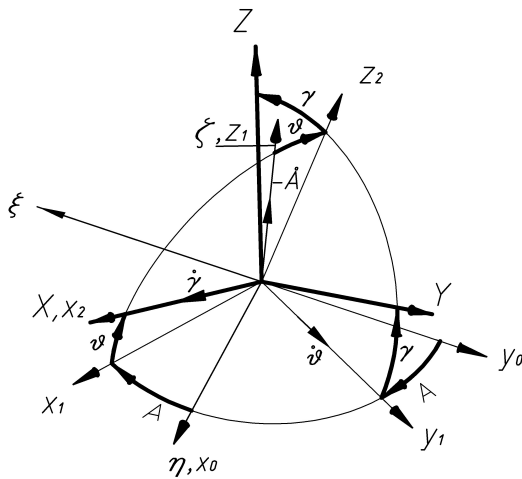


Рис. 1. Кінематика безплатформної курсовертикалі

$$\begin{cases} \vec{r}_1 = C^{n \rightarrow b} \cdot \vec{r}_1, & \vec{r}_1(0) = [0, 0, 1]^T; \\ \vec{y} = \vec{r}_1 + \vec{w}. \end{cases} \quad (3)$$

Вибір $\vec{r}_1(0) = [0, 0, 1]^T$ обумовлюється тим, що на початковому етапі зазвичай орієнтація об'єкта невідома і ми приймаємо, що вісі СК x_{yz} і СК $\xi\eta\zeta$ співпадають. Тобто МНК $C^{n \rightarrow b}$ має вигляд одиничної матриці $[3 \times 3]$, а тому 3-й рядок буде записуватися вищенаведеним чином.

Перейдемо до другого каналу корекції – корекції за сигналами магнітометрів. Запишемо результати вимірювання цих чутливих елементів у зв'язаній системі координат (див рис. 1)

$$\vec{m}_{xyz}^b = C^{n \rightarrow b} \vec{T}_n; \quad \vec{T}_n = [0 \ H \ Z]^T, \quad (4)$$

де \vec{T}_n – вектор індукції магнітного поля Земля. Для широти Києва ці складові становлять $H = 18964$ нТ, $Z = -46962$ нТ. Розкриємо вираз (4)

$$\begin{aligned} \vec{m}_{xyz}^b &= \begin{bmatrix} m_x^b & m_y^b & m_z^b \end{bmatrix}^T = C^{n \rightarrow b} \vec{T}_n = (C^{b \rightarrow n})^T \vec{T}_n = \\ &= \begin{bmatrix} \sin A \cos \vartheta & \cos A \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\cos A \cos \gamma - \sin A \sin \gamma \sin \vartheta & \sin A \cos \gamma - \cos A \sin \gamma \sin \vartheta & \cos \vartheta \sin \gamma \\ \cos A \sin \gamma - \sin A \cos \gamma \sin \vartheta & -\sin A \sin \gamma - \cos A \cos \gamma \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ H \\ Z \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} H \cdot c_{21}^{b \rightarrow n} + Z c_{31}^{b \rightarrow n} \\ H \cdot c_{22}^{b \rightarrow n} + Z c_{32}^{b \rightarrow n} \\ H \cdot c_{23}^{b \rightarrow n} + Z c_{33}^{b \rightarrow n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \cdot \cos A \cos \vartheta + Z \sin \vartheta \\ H \cdot (\sin A \cos \gamma - \cos A \sin \gamma \sin \vartheta) + Z \cos \vartheta \sin \gamma \\ H \cdot (-\sin A \sin \gamma - \cos A \cos \gamma \sin \vartheta) + Z \cos \vartheta \cos \gamma \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналізуючи вираз (5), видно, що він складається із суми двох складових – проекції горизонтальної складової та проекції вертикальної складової магнітного поля Землі. Маючи апріорні знання про магнітне поле та результати оцінки орієнтації об'єкта з першого етапу (вектор \vec{r}_1), із показів магнітометрів можна виділити складову, що дає змогу оцінити другий рядок МНК $C^{b \rightarrow n}$ (або те ж саме, що другий стовпчик $C^{n \rightarrow b}$):

$$c_{21}^{b \rightarrow n} = \frac{m_x^b - Z c_{31}^{b \rightarrow n}}{H}; \quad c_{22}^{b \rightarrow n} = \frac{m_y^b - Z c_{32}^{b \rightarrow n}}{H}; \quad c_{23}^{b \rightarrow n} = \frac{m_z^b - Z c_{33}^{b \rightarrow n}}{H}. \quad (6)$$

З виразу (6) ми можемо записати рівняння вимірювань, як $\vec{y}_2 = \frac{\vec{m}_{xyz}^b - Z \cdot \vec{r}_1}{H}$.

Аналогічно до (3), запишемо рівняння другого каналу корекції у просторі станів.

Для зручності введемо позначення для другого рядка МНК через $\vec{r}_2 = (c_{21}^{b \rightarrow n}; c_{22}^{b \rightarrow n}; c_{23}^{b \rightarrow n})^T$:

$$\begin{cases} \vec{r}_2 = C^{n \rightarrow b} \cdot \vec{r}_2, & \vec{r}_2(0) = [0, 1, 0]^T; \\ \vec{y}_2 = \vec{r}_2 + \vec{w}_2, \end{cases}$$

де \vec{w}_2 – випадкові збурення магнітометрів, модель яких приймається у вигляді білого шуму.

Перший рядок МНК $C^{b \rightarrow n}$ можна отримати, використовуючи відомі співвідношення між елементами МНК [3, ст. 34].

Алгоритм БКВ на основі вищенаведених викладок з використанням оптимальної Калманівської фільтрації наведено в наступному розділі статті.

Фільтр Калмана алгоритму БКВ з розділенням каналів корекції для матриці напрямних косинусів

1) Стадія передбачення

$$\begin{cases} \vec{r}_1 = C^{n \rightarrow b} \cdot \vec{r}_1, & \vec{r}_1(0) = [0, 0, 1]^T, \\ \vec{r}_2 = C^{n \rightarrow b} \cdot \vec{r}_2, & \vec{r}_2(0) = [0, 1, 0]^T. \end{cases}$$

Проінтегрувати кінематичні рівняння можна, використовуючи різні алгоритми [3, с.62-66], проте один із найпростіших методів – це використання матричної експоненти. Тоді дискретний алгоритм матиме наступний вигляд

$\Phi = e^{\Omega_b^{nb} h}$ – перехідна матриця, h – крок інтегрування,

$$\Omega_b^{nb} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{aligned} r_{1\ k+1/k} &= \Phi \cdot r_{1\ k/k} \cdot \\ r_{2\ k+1/k} &= \Phi \cdot r_{2\ k/k}, \end{aligned}$$

де $r_{1\ k/k}, r_{2\ k/k}$ – 3-й та 2-ий рядок МНК $C^{b \rightarrow n}$, отриманий на попередньому кроці алгоритму;

$r_{1\ k+1/k}, r_{2\ k+1/k}$ – апріорна оцінка рядків МНК по вимірюваннях ДКШ.

Далі необхідно розрахувати апріорну коваріаційну матрицю похибок $P_{k+1/k}$

$$P_{1\ k+1/k} = \Phi \cdot P_{1\ k/k} \cdot \Phi^T + Q_1, \quad P_{2\ k+1/k} = \Phi \cdot P_{2\ k/k} \cdot \Phi^T + Q_2,$$

де Q_1, Q_2 – квадратні матриці дисперсій шумів ДКШ та акселерометрів; $P_{1\ k/k}, P_{2\ k/k}$ – коваріаційні матриці похибок оцінювання для акселерометрів та магнітометрів, розраховані на попередньому кроці.

2) Стадія корекції

а) Корекція за сигналами акселерометрів

$$K = P_{1\ k+1/k} \cdot (P_{1\ k+1/k} + R_1)^{-1};$$

$$r_{1\ k+1/k+1} = r_{1\ k+1/k} + K(y_1 - r_{1\ k+1/k});$$

$$P_{1\ k+1/k+1} = P_{1\ k+1/k} - K \cdot P_{1\ k+1/k},$$

де K – оптимальний коефіцієнт підсилення Калмана, R_1 – квадратна матриця дисперсій шумів акселерометрів, $P_{1\ k+1/k+1}$ – апостеріорна коваріаційна матриця похибок оцінювання, y_1 – сигнал вимірювань по даних акселерометрів.

б) Корекція за сигналами магнітометрів

$$y_{2\ k+1} = \frac{m^b - Z \cdot r_{1\ k+1/k+1}}{H};$$

$$K_2 = P_{2\ k+1/k} (P_{2\ k+1/k} + R_2)^{-1};$$

$$r_{2\ k+1/k+1} = r_{2\ k+1/k} + K_2(y_{2\ k+1} - r_{2\ k+1/k});$$

$$P_{2\ k+1/k+1} = P_{2\ k+1/k} - K_2 \cdot P_{2\ k+1/k},$$

де m^b – результати вимірювання магнітометрів, K_2 – оптимальний коефіцієнт підсилення Калмана для корекції по магнітометрах, R_2 – квадратна матриця дисперсій шумів магнітометрів, $P_{2\ k+1/k+1}$ – апостеріорна коваріаційна матриця похибок оцінювання другого рядка МНК $C^{b \rightarrow n}$.

Алгоритм БКВ з розділенням каналів корекції в кінематичних параметрах кватерніона

За основу розроблюваного алгоритму було взято алгоритм БКВ, що приведений в роботі [4]. В якості кінематичного параметра виступає кватерніон $q = (q_1, q_2, q_3, q_0)^T$, де $e = (q_1, q_2, q_3)$ – векторна частина кватерніона, q_0 – скалярна частина. Далі наведемо цей алгоритм із поясненням, не змінюючи позначення першоджерела [4, р.31-33]:

1) Ініціалізація фільтра

На даному кроці необхідно задати апріорні значення коваріаційних матриць дисперсій шумів передбачення та вимірювань, котрі можна обчислити

$$Q_k = E[\epsilon_k \epsilon_k^T],$$

$$R_{k+1} = E[\delta b_k \delta b_k^T],$$

де ϵ_k – вектор шумів ДКШ, δb_k – вектор шумів позиційних датчиків, Q_k – матриця коваріації випадкових похибок ДКШ, R_{k+1} – матриця коваріації випадкових похибок позиційних датчиків (акселерометрів чи магнітометрів), $E[\]$ – математичне сподівання.

Також необхідно обрати початкове значення для кватерніона орієнтації. При відсутності початкової оцінки приймають $\hat{q}_{0/0}^T = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$.

2) Стадія передбачення

$$\Omega_k = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -[\omega_k \times] & \omega_k \\ -\omega_k^T & 0 \end{bmatrix}, [\omega_k \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix},$$

де $\omega_k = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ – вектор вимірювань кутової швидкості.

Далі необхідно розрахувати перехідну матрицю Φ_{qk}

$$\Phi_{qk} = e^{\Omega_k \Delta t},$$

де Ω_k – кватерніонна кососиметрична матриця кутових швидкостей, Δt – крок дискретизації алгоритму.

Розрахунок кватерніона орієнтації $\hat{q}_{k+1/k}$ на стадії передбачення алгоритму

$$\hat{q}_{k+1/k} = \Phi_{qk} \hat{q}_{k/k}.$$

Обчислення коваріаційних матриць:

$$Q_k^q = \left(\frac{\Delta t}{2} \right)^2 \Sigma_k \cdot Q_k^\epsilon \cdot \Sigma_k^T,$$

$$P_{k+1/k} = \Phi_{qk} \cdot P_{k/k} \cdot \Phi_{qk}^T + Q_k^q,$$

де Q_k^q – кватерніонна коваріаційна матриця, $P_{k+1/k}$ – апіорна коваріаційна матриця похибок оцінювання, $P_{k/k}$ – значення коваріаційної матриці похибок оцінювання з попереднього кроку. Матриця Σ_k розраховується за формулою

$$\Sigma_k \square \begin{bmatrix} [\mathbf{e} \times] + q_4 I_3 \\ -\mathbf{e}^T \end{bmatrix} \text{ відповідно до складових кватерніона } \hat{q}_{k/k}.$$

3) Стадія корекції

$$s_{k+1} = \frac{1}{2}(b_{k+1} + r_{k+1});$$

$$d_{k+1} = \frac{1}{2}(b_{k+1} - r_{k+1});$$

$$H_{k+1} = \begin{bmatrix} -[s_{k+1} \times] & d_{k+1} \\ -d_{k+1}^T & 0 \end{bmatrix};$$

$$R_{k+1}^q = \frac{1}{4} \Sigma_{k+1} R_{k+1} \Sigma_{k+1}^T + \alpha I_4; \quad S_{k+1/k} = H_{k+1} P_{k+1/k} H_{k+1}^T + R_{k+1}^q;$$

$$K_{k+1} = P_{k+1/k} H_{k+1}^T S_{k+1/k}^{-1};$$

$$\hat{q}_{k+1/k+1} = (I_4 - K_{k+1} H_{k+1}) \hat{q}_{k+1/k};$$

$$P_{k+1/k+1} = (I_4 - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1/k} (I_4 - K_{k+1} H_{k+1})^T + K_{k+1} R_{k+1}^q K_{k+1}^q,$$

де b_{k+1} – сигнал вимірювання позиційних датчиків, r_{k+1} – опорний вектор. s_{k+1}, d_{k+1} – вектори для формування матриці вимірювань H_{k+1} , R_{k+1}^q – кватерніонна матриця коваріації випадкових похибок позиційних датчиків, I_4 – одинична діагональна матриця розміром $[4 \times 4]$, α – коефіцієнт другого порядку малості по відношенню R_{k+1} (необхідно для забезпечення стійкості алгоритму), K_{k+1} – оптимальний множник Калмана, $\hat{q}_{k+1/k+1}$ – апостеріорне значення кватерніона орієнтації, $P_{k+1/k+1}$ – апостеріорна коваріаційна матриця похибок оцінювання орієнтації. Матриця Σ_{k+1} розраховується по формулі $\Sigma_{k+1} = \begin{bmatrix} [e \times] + q_4 I_3 \\ -e^T \end{bmatrix}$ відповідно до складових кватерніона $\hat{q}_{k+1/k}$.

Вищеописаний алгоритм призначений для виконання корекції лише по одному вектору, аналогічно можна доповнити стадію корекції для другого вектора (за сигналами магнітометрів). Проте таке формування корекції призводить до виникнення перехресного впливу другої стадії корекції на першу при використанні даних з акселерометрів та магнітометрів. Як було сказано раніше, сигнали акселерометрів використовуються для корекції по кутах крену і тангажу, а магнітометри необхідно використовувати для корекції курсового каналу. Інформацію про курс несе горизонтальна складова магнітного поля Землі, а тому при формуванні корекції по магнітометрах потрібно певним чином позбавитися від впливу вертикальної складової. Один із варіантів був показаний вище, а в даному алгоритмі пропонується позбавитися від вертикальної складової магнітного поля без апріорних відомостей про нього і формувати сигнал корекції лише на основі даних про горизонтальну складову магнітного поля Землі. Можливість такої реалізації найпростіше продемонструвати з використанням МНК послідовних переходів для кінематики на рис.1:

$$\xi\eta\zeta(x_0 y_0 z_0) \xrightarrow{A} x_1 y_1 z_1 \xrightarrow{\vartheta} x_2 y_2 z_2 \xrightarrow{\gamma} XYZ.$$

Кожен такий перехід від однієї системи координат до іншої можна описати елементарною МНК:

C_A	ξ	η	ζ
x_1	$\cos A$	$-\sin A$	0
y_1	$\sin A$	$\cos A$	0
z_1	0	0	1

C_ϑ	x_1	y_1	z_1
x_2	$\cos \vartheta$	0	$\sin \vartheta$
y_2	0	1	0
z_2	$-\sin \vartheta$	0	$\cos \vartheta$

C_γ	x_1	y_1	z_1
X	1	0	0
Y	0	$\cos \gamma$	$\sin \gamma$
Z	0	$-\sin \gamma$	$\cos \gamma$

Сумарний перехід записується як $C^{n \rightarrow b} = C_\gamma C_\vartheta C_A$. Для пояснення принципу формування сигналу корекції необхідно звернути увагу на систему координат $x_1 y_1 z_1$ та матриці C_A (перехід між $\xi \eta \zeta$ та $x_1 y_1 z_1$), $C_{\vartheta \gamma} = C_\vartheta C_\gamma$ (перехід між $x_1 y_1 z_1$ та XYZ). З вищенаведених формул для МНК добре видно, що матриця C_A залежить лише від кута курсу, а матриця $C_{\vartheta \gamma}$ – кутів крену і тангажу, а система координат $x_1 y_1 z_1$ повернута відносно $\xi \eta \zeta$ навколо вертикальної вісі ζ на кут курсу. Можна сказати, що необхідно добитися такого формування сигналу корекції, щоб ці дві складові повороту оцінювалися незалежно. Перший етап корекції виконується за сигналами акселерометрів, а тому зрозуміло, що після цього етапу можна оцінити складову повороту $C_{\vartheta \gamma}$. Використовуючи цю інформацію, необхідно перепроєктувати сигнал вимірювань магнітометрів в систему $x_1 y_1 z_1$. У цій системі координат сигнал буде складатися з двох горизонтальних проекцій магнітного поля H_{x1} та H_{y1} , та вертикальної складової Z_{z1} . Дана вертикальна складова така ж сама як і у вихідній системі координат $\xi \eta \zeta$. Маючи такий перепроєктований вектор $m_{x1y1z1} = (H_{x1}; H_{y1}; Z_{z1})^T$, ми можемо створити сигнал з магнітометрів, який залежить лише від інформаційної горизонтальної складової магнітного поля Землі. Тобто для цього необхідно обнулити третю складову вектора $m_{x1y1z1} - Z_{z1}$. Тоді ми отримаємо корегований вектор вимірювань магнітного поля $m_{x1y1z1}^{\text{кор}} = (H_{x1}; H_{y1}; 0)^T$. Щоб виконати корекцію по вищенаведеному алгоритму в кватерніонах, потрібно мати вимірювання у зв'язаній системі координат. А тому сформуємо корегований сигнал магнітометрів, перепроєктувавши $m_{x1y1z1}^{\text{кор}}$ у зв'язану систему координат:

$$m_{XYZ}^{\text{кор}} = (C_{\vartheta \gamma})^T m_{x1y1z1}^{\text{кор}}. \quad (7)$$

Використовуючи для корекції сигнал вимірювань виду (7), необхідно модифікувати опорний вектор магнітного поля Землі з $r_{\text{magn}} = (0; H; Z)$ на $r_{\text{magn}}^{\text{кор}} = (0; H; 0)$. Модифікувавши таким чином вихідний алгоритм, ми отримаємо алгоритм з розділеними каналами, де корекція по кутах крену і тангажу ведеться за сигналами акселерометрів, а по куту курсу – за сигналами магнітометрів. Для обчислення матриці $C_{\vartheta \gamma}$ в цьому алгоритмі необхідно використовувати оцінку кватерніона орієнтації $\hat{q}_{k+1/k}$, отриману на першому етапі корекції алгоритму:

$$C_{\vartheta \gamma} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(-q_0 q_3 + q_1 q_2) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_0 q_3 + q_1 q_2) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(-q_0 q_1 + q_2 q_3) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_0 q_1 + q_2 q_3) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}.$$

Висновки

У роботі представлено два алгоритми для безплатформних курсовертикалей на базі мікромеханічних датчиків.

Перший алгоритм БКВ – алгоритм із розділенням каналів корекції на основі фільтра Калмана для матриці напрямних косинусів. У даному алгоритмі для усунення впливу вимірювань магнітометрів на оцінку кутів крену і тангажу, оцінка елементів МНК виконується по стовпцях. Корекція оцінки третього стовпця МНК виконується на основі сигналів акселерометрів. На другому етапі корекції, при оцінці другого стовпця МНК, використовуються дані з етапу корекції за сигналами акселерометрів. Використовуючи оцінку третього стовпця МНК, з даних магнітометрів розраховується вектор вимірювань. У ньому з сигналів магнітометрів віднімають проекції вертикальної складової магнітного поля Землі на вісі чутливості датчиків. Таким чином корекція по курсу ведеться лише на основі даних про горизонтальну складову магнітного поля Землі.

Другий алгоритм БКВ – алгоритм із розділенням каналів корекції на основі фільтра Калмана для кватерніонів. У даному алгоритмі позбавляються від вертикальної складової магнітного поля без апріорних відомостей про нього, а сигнал корекції формується лише на основі даних про горизонтальну складову магнітного поля Землі. Маючи інформацію з етапу корекції за сигналами акселерометрів, сигнал магнітометрів перепроєктовується в таку систему координат, в котрій можливо виконати обнулення вертикальної складової Z_{z1} магнітного поля у вимірюваннях датчиків. Для проведення корекції за сигналами магнітометрів у даному алгоритмі виконано модифікацію опорного вектора магнітного поля Землі з $r_{magn} = (0; H; Z)$ на $r_{magn}^{кор} = (0; H; 0)$.

Подальші робота полягає в необхідності проведення натурних досліджень для оцінки точності роботи запропонованих алгоритмів. Актуальним також є задача порівняння ефективності роботи запропонованих алгоритмів у типових режимах руху об'єкта у порівнянні з іншими алгоритмами для безплатформних курсовертикалей.

Література

1. Лакоза С. Л. Побудова курсовертикалі з розділенням каналів корекції. Частина 1: Теоретичні основи розділення каналів корекції / С. Л. Лакоза, В. В. Мелешко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 5-13.
2. Rehbinder H. Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies / H. Rehbinder, Xiaoming Hu // Automatica. – 2004. – Vol. 40, issue 4. – pp. 653-659.
3. Мелешко В. В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: учебное пособие / В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко. – Кировоград: Полимед-Сервис, 2011. – 172 с.
4. Choukroun, Daniel. 2003. Novel methods for attitude determination using vector observations. Thesis (Ph.D.) – Technion - Israel Institute of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, 2003.

Надійшла до редакції
03 червня 2014 року

© Лакоза С. Л., Мелешко В. В., 2014